

海藻が繁茂する場の波高減衰の特性

浅野 敏之*・筒井 勝治**・酒井 哲郎***

1. はじめに

近年、市民が海に親しむ場として海浜の持つ役割が重視され、海岸環境の保全や親水性海浜の整備への要請が強まりつつある。こうした要請に応える海岸保全工法の一つとして、人工海藻を海底に敷設して波浪の変形をもたらす砂移動を制御する工法も検討対象となっている^{1),2)}。

しかしながら、人工海藻の上を伝播する波の変形や水粒子速度場の特性については、現在に至るまでほとんど明らかにされていない。Priceら³⁾は人工海藻を敷設したときの水粒子速度場を動粘性係数の異なる二層流でモデル化した。また同時に波の減衰と質量輸送速度に関する水槽実験を行って、その結果がモデルから得られる結果と一致することを示している。しかし、そこでは海藻が存在するときの水理学的な考察は全くなされておらず、単に実験結果と合うように動粘性係数の値を定めたにすぎない。これ以後も、この課題の基礎的な研究は著者の知る限り全くない。

本研究は海藻が繁茂するときの波高減衰の特性について、理論的・実験的に検討したものである。まず海藻の寸法、植生密度等と波高減衰率の関係を記述する理論的なモデルを考察し、次いで実験水槽内に擬似海藻を敷設して、波高減衰の特性を実験的に明らかにした。その結果、人工海藻による養浜工法の実用化に向けての基礎となるいくつかの知見が得られたので、以下に報告する。

2. 海藻による波高減衰の理論

(1) 海藻が繁茂するときの流速場の解析

図-1 に示すように、海藻群落を有する内部領域と、その上部の外部領域の2層からなる流体場を考える。ここに d は揺動する海藻群の平均の高さである。室田・福原⁴⁾ の考え方にない、海藻の揺動が流体運動に及ぼす効果を理論展開の中のいくつかのパラメータに集約し、取り扱いを簡略化する。

内部領域における運動方程式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} - \frac{1}{2} C_D C_V d_0 u |u| \quad \cdots (1)$$

ここに、 u ：水平方向水粒子速度、 p ：圧力、 ρ ：流体の密度、 τ ：せん断応力、 C_D ：海藻群落の1本あたりの抗力係数、 C_V ：水平面内における海藻の面密度、 d_0 ：海藻の等価直径である。右辺第3項は、海藻への抗力の反作用として生じる流体への付加応力である（ただし、海藻の相対運動を無視）が、 u について非線形であるため次式のようにフーリエ級数の第1項で置き換えて線形化する。

$$\frac{1}{2} C_D C_V d_0 |u| u = \frac{4}{3\pi} C_D C_V d_0 \hat{u} \cdot u = D u \quad \cdots (2)$$

ただし、

$$D = \frac{4}{3\pi} C_D C_V d_0 \hat{u} \quad \cdots (3)$$

$\hat{u}$ は水粒子速度振幅で、繰り返し計算で求められる。Darymple-Liu⁵⁾ による底泥上の波動の解析にならい、水粒子速度を非回転成分と回転成分に分離する。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} u &= \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right) + U_1 & : -h < z < 0 \\ u &= \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right) + U_2 + U_3 & : -(h+d) < z < -h \end{aligned} \right\} \quad \cdots (4)$$

ここに、 ϕ_1 、 ϕ_2 はそれぞれ上層、下層の速度ポテンシャル、 U_1 、 U_2 および U_3 はそれぞれ界面から発達する上層および下層の回転成分流速、及び底面から発達する下層における回転成分流速である（図-1）。層流境界層理論によれば、 U_i ($i=1, 2, 3$) は界面及び底面から $(\varepsilon_i/\sigma)^{1/2}$

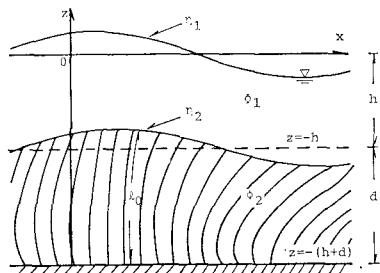


図-1 二層流モデルの模式図

* 正 会 員 工 博 京都大学助手 工学部土木工学科

** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科

*** 正 会 員 工 博 京都大学助教授 工学部土木工学科

(ε_i ($i=1, 2$): 動粘性係数, σ : 角周波数) のオーダーの範囲で値を有し, それ以外の領域では非回転成分のみとなる。

ただし, (1) 式右辺第3項が小さくなければ, 界面と底面の近傍のみ回転成分を考慮し, それ以外の領域を速度ポテンシャルで記述するという取り扱い, 厳密には正しくない。その場合には, 水平及び鉛直方向の水粒子速度 u , w と圧力 p に関する多元の連立微分方程式を解く必要があるが, 波高減衰率 k_i を陽な形で解析的に表示することはきわめて難しくなる。人工海藻は, 沿岸方向に有限な長さで設置されることになるが, そのときには回折・屈折などの効果を考慮した3次元の波浪変形を考える必要がある。最近, Kirbyら⁶⁾によって, 海底摩擦による波高減衰をも含めた放物型方程式が提案されているが, k_i を陽に求めておけば, 3次元問題への拡張にも容易に対処できる。また, 通常の条件下では右辺第3項は後述するエネルギー逸散に対しては大きく寄与するものの, 水粒子速度に対する影響は小さいので, 上述の枠組みの下で解析を行っても波高減衰率の結果には大きな相違は生じないと考えられる。

ϕ_i , U_i に対する方程式として, 次式が得られる。

$$\nabla^2 \phi_i = 0 \quad (i=1, 2):$$

$$-h < z < 0, \quad -(h+d) < z < -h \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} = \varepsilon_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial z^2}: \quad -h < z < 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} = \varepsilon_2 \frac{\partial^2 U_i}{\partial z^2} - D \left(U_i + \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right) \quad (i=2, 3):$$

$$-(h+d) < z < -h \quad \dots\dots\dots (7)$$

速度ポテンシャル ϕ_i を線形化された境界条件式の下で求めると次式となる。

$$\phi_1 = -\frac{iga}{\sigma} \sinh kz [(\sigma^2/gk) + \coth kz] e^{i(kx - \sigma t)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\phi_2 = -\frac{iga}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h+d)}{\cosh k(h+d)} e^{i(kx - \sigma t)}$$

$$= -i\tilde{\phi}_2 \cosh k(z+h+d) e^{i(kx - \sigma t)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに, a は水位変動の振幅である。

(6) 式より U_1 の一般解は,

$$U_1 = C_1 \exp\{-\beta(z+h)\} \exp[i(kx - \sigma t + \beta(z+h))] \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。上式で $\beta = \sqrt{\sigma^2/\varepsilon_1}$ であり, C_1 は複素係数, k は複素数の波数で, $k = k_r + ik_i$ と書き換えると, $\exp(-k_i x)$ の減衰項が生じる。

一方, (7) 式は非斉次の微分方程式となり, 境界面近傍での補正流速 U_2 は次式で与えられる。

$$U_2 = C_2 \exp[\mu(z+h)] \exp[i(kx - \sigma t + \nu(z+h))] + \xi \cosh k(z+h+d) \exp[i(kx - \sigma t)] \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに,

$$\mu + i\nu = -[(D - i\sigma)/\varepsilon_2]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\xi = \frac{kD\tilde{\phi}_2}{\varepsilon_2 k^2 - D + i\sigma} \quad \dots\dots\dots (13)$$

である。(10), (11) 式の C_1 , C_2 は次の境界条件によって決定される。

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} + U_1 = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} + U_2, \quad \text{at } z = -h \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\varepsilon_1 \frac{\partial U_1}{\partial z} = \varepsilon_2 \frac{\partial U_2}{\partial z}, \quad \text{at } z = -h \quad \dots\dots\dots (15)$$

以上より,

$$C_1 = \frac{\zeta \cosh kd + \varepsilon_2 k \sinh kd}{\zeta + \lambda} \xi \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_2 k \sinh kd - \lambda \cosh kd}{\zeta + \lambda} \xi \quad \dots\dots\dots (17)$$

ただし,

$$\zeta = \sqrt{(D - i\sigma)\varepsilon_2}, \quad \lambda = \sqrt{-i\sigma\varepsilon_1} \quad \dots\dots\dots (18)$$

である。

底面近傍での補正流速 U_3 についての運動方程式も, (7) 式であり, その解は次式で与えられる。

$$U_3 = C_3 \exp[-\mu(z+h+d)]$$

$$\cdot \exp[i\{kx - \sigma t - \nu(z+h+d)\}]$$

$$+ \xi \cosh k(z+h+d) \exp[i\{kx - \sigma t\}] \quad \dots\dots\dots (19)$$

境界条件

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial x} + U_3 = 0 \quad \text{at } z = -(h+d) \quad \dots\dots\dots (20)$$

より, C_3 が次のように求められる。

$$C_3 = -k \frac{\varepsilon_2 k^2 + i\sigma}{\varepsilon_2 k^2 - D + i\sigma} \tilde{\phi}_2 \quad \dots\dots\dots (21)$$

(2) 波高減衰係数の誘導

(1) 式に u を乗じて $z = -(h+d)$ から $z = \eta_1$ まで積分し, さらに時間平均を行うと, 波のエネルギー密度 $\bar{E}$ に関する次式が得られる。

$$\frac{d\bar{E}}{dt} = c_g \frac{d\bar{E}}{dx} = -\bar{P}_S - \bar{P}_D \quad \dots\dots\dots (22)$$

ただし,

$$\bar{P}_S/\rho = \varepsilon_1 \int_{-h}^{''\infty''} \left(\frac{\partial U_1}{\partial z} \right)^2 dz + \varepsilon_2 \int_{''-\infty'', -h}^{-h} \left(\frac{\partial U_2}{\partial z} \right)^2 dz$$

$$+ \varepsilon_2 \int_{-(h+d)}^{''\infty''} \left(\frac{\partial U_3}{\partial z} \right)^2 dz \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$\bar{P}_D/\rho = D \int_{-(h+d)}^{-h} \left\{ \frac{\partial \phi_2}{\partial x} + U_2 + U_3 \right\}^2 dz \quad \dots\dots\dots (24)$$

ここで $\bar{P}_S$ はせん断応力によってなされるエネルギー逸散, $\bar{P}_D$ は海藻の流体抵抗に起因するエネルギー逸散を表わす。 ϕ_2 , U_1 , U_2 , U_3 の記述式を (23), (24) に代入し計算を行うと,

$$\bar{P}_S/\rho e^{-2ki x} = \left\{ \varepsilon_1 \frac{\beta |C_1|^2}{2} + \varepsilon_2 \left[\frac{(\mu^2 + \nu^2)(|C_2|^2 + |C_3|^2)}{2\mu} + |\xi|^2 k \left(\frac{\sinh 2kd}{2} - kd \right) \right] \right\} \dots (25)$$

$$\bar{P}_D/\rho e^{-2ki x} = D \left\{ \frac{|C_2|^2 + |C_3|^2}{4\mu} + \frac{1}{4k} |k\phi_2 + \xi|^2 \cdot \left(\frac{\sinh 2kd}{2} + kd \right) \right\} \dots (26)$$

が得られる。

いま、水位変動を

$$\eta_1(x) = a_0 \exp i(kx - \omega t) \dots (27)$$

と置くと、最終的に(22)式より波高減衰係数 k_i が次式で計算される。

$$k_i = \frac{1}{gc_0 a_0^2} \{ \text{R.H.S. (25)} + \text{R.H.S. (26)} \} \dots (28)$$

(3) 諸係数の設定

内部領域の高さ d は海藻の長さ l_0 と次の関係で結ばれる。

$$l_0 = \int_0^d \sqrt{1 + \left(\frac{d\delta_x}{dz} \right)^2} dz \dots (29)$$

ここに δ_x は海藻の水平方向変位で、浮力が復元力になることを考えると海藻素材の比重の関数となり、また素材の剛性の関数でもある。ただし、今回の計算では簡単に $d=l_0$ と置いた。

室田・福原は、重力と植生群落の抵抗力がつり合うとして、水面勾配の実測結果から植生1本あたりの抗力係数 C_D を次式のように評価した。

$$C_D = 640 Re^{-0.72} \dots (30)$$

波動運動下における植生の抗力係数に関する研究は見あたらないことから、ここでは開水路において得られた上記の C_D の評価式を準用する。ただし、レイノルズ数 Re 中の代表流速には、水粒子速度振幅 $\hat{u}$ を用いた。海藻の面密度 C_V は次式で算定される。

$$C_V = \frac{N}{BL} \frac{l_0}{d+h} \approx \frac{N}{BL} \frac{d}{d+h} \dots (31)$$

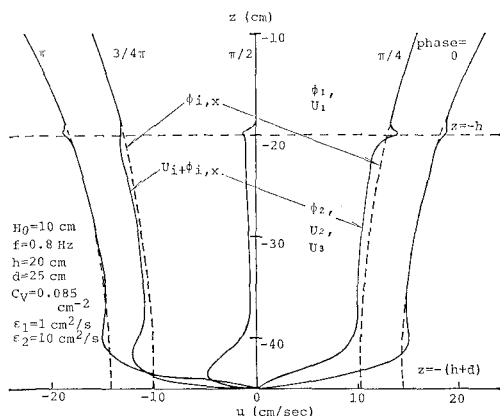


図-2 水平方向水粒子速度の計算結果

ここに N : 海藻の本数, BL : 植生の面積である。渦動粘性係数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ は波の条件や海藻の揺動状態によって異なるであろうが、これを正しく見積ることは難しい。以下の計算では、 $\varepsilon_1=1 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $\varepsilon_2=10 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度を標準的な値として設定した。

図-2 は、本理論で計算された水平方向水粒子速度の鉛直分布の一例である。ポテンシャル成分からのずれは、底面近傍における U_3 の成分がもっとも大きい。また $\pi/2$ を中心とする位相では、下層全体が 1 cm/sec 程

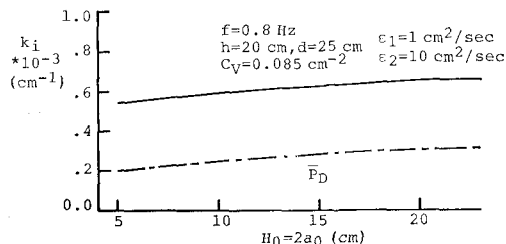


図-3 初期波高 H_0 と波高減衰率 k_i の関係

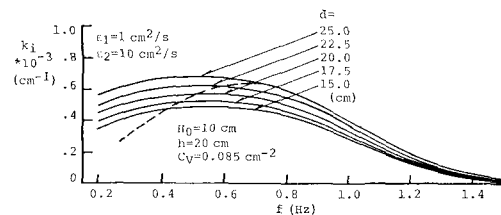


図-4 周波数 f と波高減衰率 k_i の関係

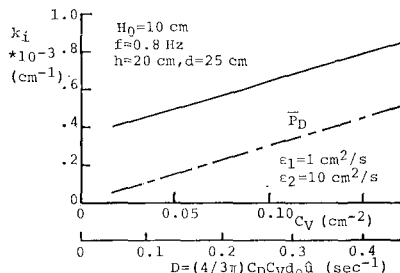


図-5 植生密度 C_V と波高減衰率 k_i の関係

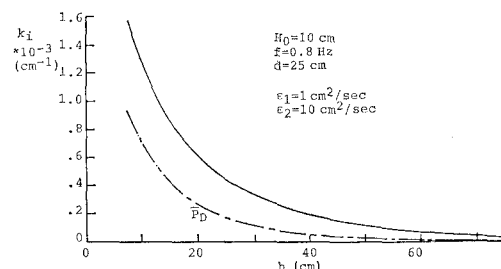


図-6 上層の水深 h と波高減衰率 k_i の関係

度様に小さくなっている。ただし、この成分の $\bar{P}_s$ への寄与は小さい。

3. 波および海藻の諸元と波高減衰率の関係

計算条件には後述する実験条件に近い値を設定し、式(28)に基づいて波高減衰率 k_i を求めた。図-3 は初期波高 H_0 の効果を示したもので、図中一点鎖線は抗力 $\bar{P}_D$ による波高減衰率への寄与分である。通常、波高減衰率は波高に無関係となるが、ここで取り扱う海藻が繁茂する場では、流速の2乗に比例する抗力項によって波高とともに k_i が増加することがわかる。

図-4 は周波数による k_i の変化を調べたものである。周波数が高くなると k_i が減少するのは、波による水粒子運動が深くまで到達しないためであるが、周波数が低くなくても k_i は減少することがわかる。図-5 は植生密度 C_V と k_i の関係を示したものである。(3) 式より、 C_V が変化するときの効果は C_D や d_0 が変化する効果と等しく、これらは一括して D の変化としてとらえることができる。図-6 は上層の水深 h による変化を示したものである。

4. 擬似海藻による波高減衰の実験

擬似海藻には比重の0.9のポリプロピレン製荷作りロープを用いた。その寸法は長さ25 cm、幅5.2 cm、厚さ30 μ で、剛性は無視でき浮力が外力に対する復元力となっている。この擬似海藻を一定間隔で金網板にくくりつけ、全長8 mにわたって水槽底に設置した。容量式波高

計を2 mおきに6台設置し、波高、周期、海藻の植生密度、上層の水深を系統的に変えて、波高減衰の様子を測定した。波高の測定結果の一例を図-7に示す。波高は指数的に減少し、減衰係数 k_i が容易に求められる。

図-8 は、波高 H_0 と k_i の関係を示したもので、図-3の計算結果と定性的に一致する。計算において渦動粘性係数や海藻の等価直径を変化させれば、 k_i を定量的にも一致させることは可能である。

図-9 は k_i の変化を波の周波数で整理したもので、各々の周波数に対し初期波高の大きい場合と小さい場合の結果を示した。図中の H_0 の値は各周波数における平均値である。 k_i は $f=0.7\sim 0.8$ Hz で極大となり、全体的な傾向は図-4の計算結果と一致するが、実験値は低周波側での k_i の減少量が大きいようである。この相違は次のような理由によるものと考えられる。海藻の動きを観察すると、高周波数の波の下ではほぼ直立した状態であるが、低周波数の波では揺動が著しい。(29)式より揺動が大きいときには、海藻群の平均的な高さ d は海藻の長さ l_0 より小さくなることを考慮すれば、図-4の破線のように周波数に応じて d の値を変えていく必要がある。また揺動が著しい場合には、海藻に相対的な水粒子速度も小さくなるため、本計算では抗力による減衰を過大評価していることになる。今後、波の作用下での海藻群の揺動特性を解析し、その特性を本モデルの諸定数に組み込んでゆけば、さらに実験値との一致は向上するものとする。

図-10および図-11は、それぞれ植生密度 C_V および上層の水深を変化させたときの k_i の結果であり、図

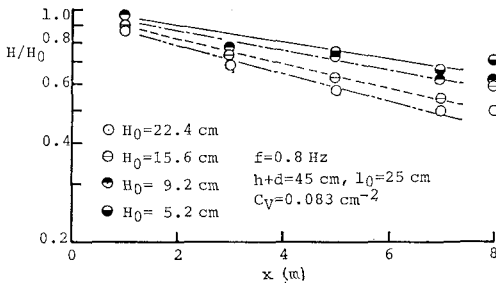


図-7 波高測定結果の一例

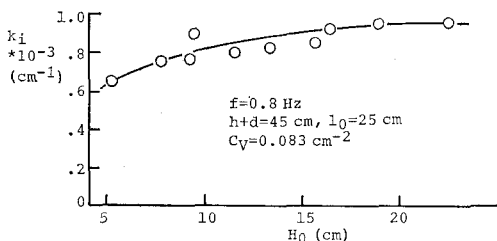
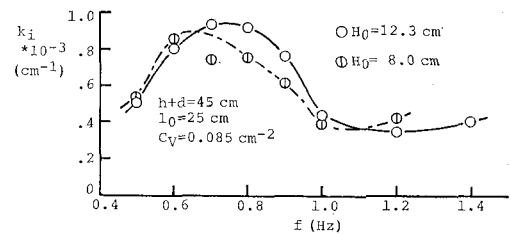
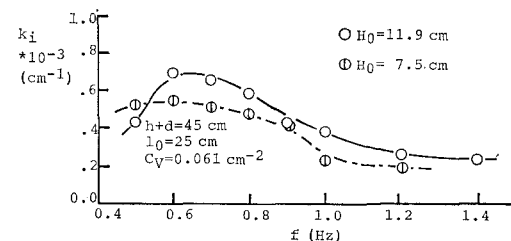


図-8 初期波高 H_0 と波高減衰率 k_i の関係

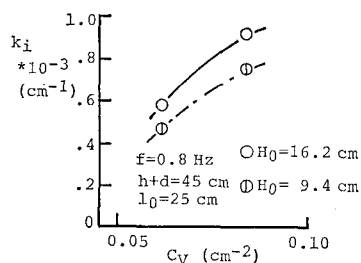
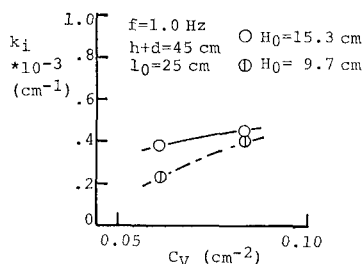


(a) $C_V=0.085 \text{ cm}^{-2}$



(b) $C_V=0.061 \text{ cm}^{-2}$

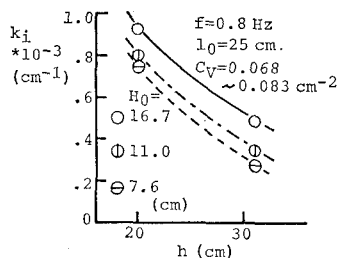
図-9 周波数 f と波高減衰率 k_i の関係

(a) $f=0.8 \text{ Hz}$ (b) $f=1.0 \text{ Hz}$ 図-10 植生密度 C_V と波高減衰率 k_i の関係

—5, 図-6 の計算結果とよい対応を示している。

5. むすびに

本研究は、海藻の寸法・植生密度等と波高減衰率の関係を記述する理論的なモデルを提示するとともに、実際に擬似海藻を水槽底に設置し、波高の減衰特性を実験的に明らかにしたものである。撓屈性を有する海藻が波によって揺動する場合の水粒子速度場はきわめて複雑であって、そのために本解析では一部で思いきった簡略化を行ったが、波高減衰率の算定式を解析的に導くことができ、その計算結果は実験結果とはほぼ一致することが確かめられた。今後は、海藻の揺動の効果をモデル中の諸定数の変化として適切に導入することにより、さらに現象

図-11 上層の水深 h と波高減衰率 k_i の関係

をより良く説明する理論を構築することが課題である。

最後に、本研究は運輸省第3港湾建設局の「人工海藻による養浜工開発調査」の研究の一部として実施したものであり、関係者各位に謝意を表する。また、助言を頂いた京都大学工学部間瀬肇助手、実験を手伝って頂いた京都大学大学院学生服部明彦君に謝意を表する。

参考文献

- 1) Rogers, S.: Artificial seaweed for shoreline erosion control, UNC Sea Grant Pub., UNC-SG-WP-8-6-4, p. 15, 1986.
- 2) Jenkins, S. A. and D. W. Skelly: Hydrodynamics of artificial seaweed for shoreline protection, Scripps Inst. Oceanogr., SIO Ref. Ser. No. 87~16, p. 66, 1987.
- 3) Price, W. A., K. W. Tomlinson and J. N. Hunt: The effect of artificial seaweed in promoting the build-up of beaches, Proc. of 11th Conf. on Coastal Engg., pp. 570~578, 1968.
- 4) 室田 明・福原輝幸: 直立性の植物を有する開水路の流れ構造について, 第28回水理講演会論文集, pp. 225~231, 1984.
- 5) Dalrymple, R. A. and P. L. F. Liu: Waves over soft muds; A two-layer fluid model, J. Phys. Oceano., Vol. 8, pp. 1121~1131, 1978.
- 6) Kirby, J. T. and R. A. Dalrymple: Modeling waves in surfzones and around islands, Proc. of ASCE, WW, Vol. 112, No. 1, pp. 78~93, 1986.